

УДК 620.22-419:519.2

# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРЫ ПОЛИМЕРНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ И НАПОЛНИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ СИМПЛЕКС-РЕШЕТЧАТЫХ ПЛАНОВ

В.В. КОПЫТКОВ

(Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель)

*Представлена рецептура полимерного состава на основе водорастворимых полимеров и наполнителя. Разработку рецептуры проводили на основе симплекс-решетчатых планов. Определена концентрация состава на основании коэффициентов значимости, способствующая максимальному проявлению двух критериев: прочности при разрыве и влагоудерживающей способности. Для описания зависимости «состав – свойство» и оптимизации полимерного состава по полученным значениям функций отклика при помощи программы «Статистика 6.0» были получены уравнения второго порядка для трехкомпонентной смеси. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных позволил установить адекватность полученных уравнений. В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что разработанный нами состав не только не уступает, но по некоторым показателям превосходит известные мировые аналоги при меньшей его стоимости.*

**Введение.** Важной экологической проблемой в лесной отрасли является широкое применение больших доз минеральных удобрений, которые в лесном комплексе оказывают отрицательное влияние на биологическое разнообразие лесных сообществ [1]. Поэтому в последние десятилетия широко используется предпосадочная обработка корневых систем растений специальными полимерными составами (ПС), которые способны формировать защитно-стимулирующие покрытия на корневых системах растений [2, 3]. Эффективность применения ПС оценивается по их влагоудерживающей способности и прочности при разрыве, образующихся на корневых системах растений покрытий. Такие характеристики способствуют защите корневых систем растений от иссушения и уменьшают повреждаемость при механизированной посадке.

Отсюда **целью работы** являлась оптимизация соотношения ингредиентов в ПС на основе двух водорастворимых полимеров и органического наполнителя по двум критериям – количество испарившейся влаги и прочности при разрыве.

**Методика проведения эксперимента.** В качестве объекта исследования был выбран ПС с тремя основными компонентами в различных концентрациях: полиакриламид (ПАА) в виде 6 %-ного полиакриламид-геля (ТУ 6-01-1049-92), натриевая соль карбоксиметилцеллюлоза (NaКМЦ ТУ РБ 00204056.150-98) и наполнитель – торф.

Прочность при разрыве покрытий из ПС определяли по ГОСТ 14236-81 на разрывной машине ZM-40. Оценку влагоудерживающей способности проводили на аналитических весах ВЛР-200 второго класса точности. Разработку рецептуры и оптимизацию состава осуществляли на основе симплекс-решетчатых планов, которые получили в последнее время широкое распространение [4]. В качестве функции отклика были выбраны прочность при разрыве покрытия и количество испарившейся влаги из ПС за 8,5 ч с момента проведения эксперимента, а в качестве факторов – концентрации ПАА, NaКМЦ, и торфа.

**Результаты и их обсуждение.** Уровни варьирования факторов (максимальное, минимальное, промежуточные (1/3 и 2/3) значения) определяли по формуле:

$$\max - \min = \Delta,$$

где  $\max$  – максимальное значение фактора;  $\min$  – минимальное значение фактора;  $\Delta$  – диапазон варьирования.

План эксперимента на основе матрицы планирования трехфакторного эксперимента включал 10 опытов. Матрица планирования и результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Для описания зависимостей «состав – свойство» и оптимизации ПС по полученным значениям функций отклика при помощи программы «Статистика 6.0» были получены уравнения второго порядка для трехкомпонентной смеси:

$$Y_1 = 34,125x + 32,179y + 36,462z + 0,684xy + 56,634xz - 57,694yz + 41,138xyz;$$

$$Y_2 = 1,399x + 1,348y + 0,321z + 7,308xy + 24,984xz - 30,037yz + 5,393xyz,$$

где  $x$  – концентрация ПАА;  $y$  – концентрация ПАА;  $z$  – концентрация торфа.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента и результаты функций отклика

| № опыта | Матрица планирования в кодированных значениях |       |      | Матрица планирования в натуральных значениях, масс. % |       |      | Функция отклика    |                      |
|---------|-----------------------------------------------|-------|------|-------------------------------------------------------|-------|------|--------------------|----------------------|
|         | ПАА                                           | NaКМЦ | торф | ПАА                                                   | NaКМЦ | торф | Y <sub>1</sub> , % | Y <sub>2</sub> , МПа |
| 1       | 1                                             | 0     | 0    | 10                                                    | 0     | 0    | 34                 | 1,30                 |
| 2       | 0                                             | 1     | 0    | 0                                                     | 10    | 0    | 32                 | 2,01                 |
| 3       | 0                                             | 0     | 1    | 0                                                     | 0     | 90   | 37                 | 0,04                 |
| 4       | 1/3                                           | 2/3   | 0    | 10/3                                                  | 20/3  | 0    | 33                 | 3,27                 |
| 5       | 2/3                                           | 1/3   | 0    | 20/3                                                  | 10/3  | 0    | 33                 | 2,23                 |
| 6       | 0                                             | 1/3   | 2/3  | 0                                                     | 10/3  | 30   | 22                 | 10,30                |
| 7       | 0                                             | 2/3   | 1/3  | 0                                                     | 20/3  | 60   | 21                 | 5,12                 |
| 8       | 2/3                                           | 0     | 1/3  | 20/3                                                  | 0     | 30   | 23                 | 9,18                 |
| 9       | 1/3                                           | 0     | 2/3  | 10/3                                                  | 0     | 60   | 21                 | 4,37                 |
| 10      | 1/3                                           | 1/3   | 1/3  | 10/3                                                  | 10/3  | 30   | 23                 | 11,62                |

Y<sub>1</sub> – количество испарившейся влаги спустя 8,5 ч с момента проведения эксперимента (относительная влажность воздуха 75 %), %; Y<sub>2</sub> – прочность при разрыве, МПа.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в центре диаграммы позволил установить адекватность полученных уравнений. По полученным уравнениям были построены графические зависимости (рис. 1 и 2) в двух вариантах – объемном и на плоскости, несущих различные смысловые нагрузки.

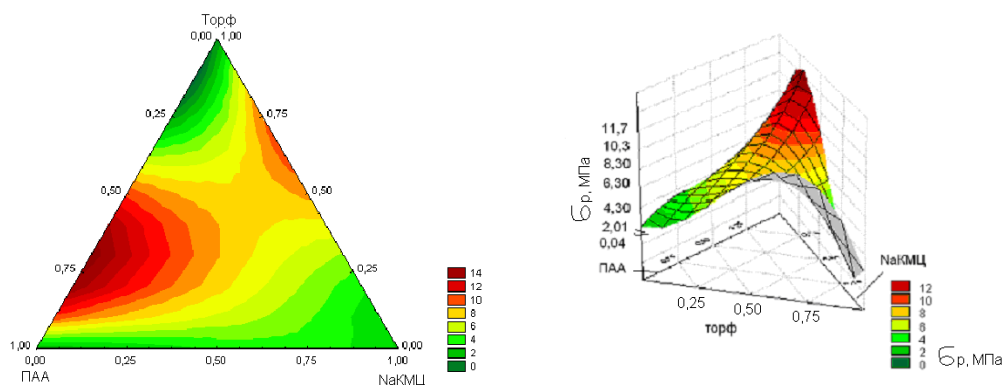


Рис. 1. Зависимость прочности при разрыве от концентрации ингредиентов в ПС

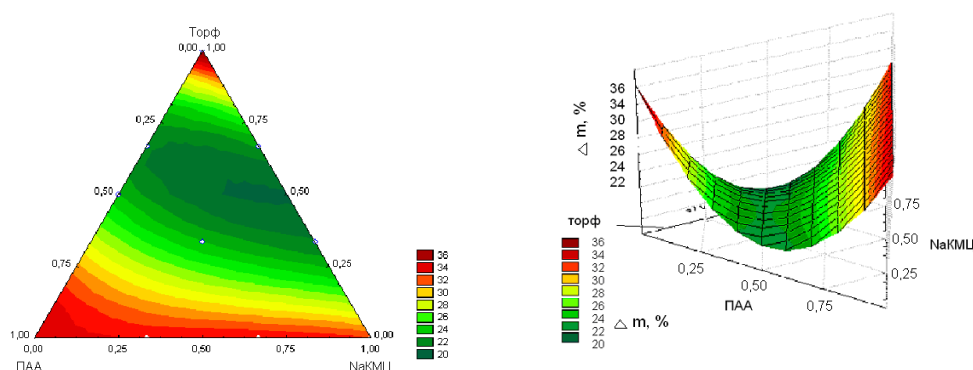


Рис. 2. Зависимость количества испарившейся влаги по прошествии 8,5 ч с момента окончания эксперимента

Объемное изображение свидетельствует о наличии минимума или максимума, а изображение на плоскости иллюстрирует границы минимума (максимума).

На рисунках 1 и 2 видно, что оптимальные концентрации ингредиентов с максимальной прочностью и влагоудерживающей способностью различны.

Условия, соответствующие максимальному проявлению функции отклика, были получены методом анализа графических зависимостей по [4, уравнения (III.3), (III.4)].

В таблице 2 представлены оптимальные значения функций и соответствующие им значения исследуемых факторов.

Таблица 2

**Расчетные оптимальные значения функций  
и соответствующие им значения исследуемых факторов**

| Функции отклика                                                       | Исследуемые факторы, % |        |      |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|--------|------|
|                                                                       | ПАА                    | NaKMIЦ | торф |
| Количество испарившейся влаги, $Y_1^{\max}$ ( $Y_1^{\max} = 19,8\%$ ) | 0,18                   | 7      | 40   |
| Прочность при разрыве, $Y_2^{\max}$ ( $Y_2^{\max} = 12,7$ МПа)        | 0,36                   | 2      | 28   |

Так как оптимальные значения концентраций ингредиентов ПС для оптимальных значений влагоудерживающей способности и прочности при разрыве различны, то на основании применения коэффициентов значимости определяем концентрации, которые будут способствовать оптимальному проявлению сразу двух факторов. В таблице 3 представлена оптимальная концентрация ингредиентов в ПС, исходя из проведенных расчетов.

Таблица 3

**Оптимальная концентрация ингредиентов в полимерном составе,  
предназначенном для обработки корневых систем растений**

| Компонент | Концентрация, масс. % |
|-----------|-----------------------|
| ПАА       | 0,27                  |
| NaKMIЦ    | 5,0                   |
| Торф      | 34                    |
| Вода      | 60,73                 |

Для установления эффективности оптимизированного ПС целесообразно провести сравнение с известными зарубежными и отечественными аналогами, которые в настоящее время широко используются в лесокультурном производстве. Важными критериями при сравнительном анализе являются не только контролируемые параметры (приживаемость растений и повреждаемость корневых систем), но и наличие (удаленность) входящих в состав ингредиентов на территории Беларуси, так как известно, что транспортные расходы могут повышать конечную стоимость продукта в 2 и более раз.

Для объективного сравнительного анализа стоимость аналогов определяли из суммы стоимости входящих в них ингредиентов. Это позволяет также не учитывать различного рода расходы (реклама, отчисления региональным представителям и т.п.), которые значительно увеличивают конечную стоимость продукта. В дальнейшем предполагается, что такие расходы для всех аналогов идентичны.

В качестве аналогов были выбраны промышленно выпускаемый в нашей республике «Корпансил» [5] и зарубежный аналог на основе альгината натрия [6]. Также для сравнительного анализа был выбран химически сшитый гидрогель на основе ПАА [7], значительно увеличивающий влагосодержание в почве и урожайность различных культур.

Сравнительные натурные испытания были проведены совместно с ГНУ «Институт леса» НАН Беларуси. Результаты сравнительных испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Сравнительная характеристика разработанного состава и известных аналогов**

| Параметр                                                      | Составы                                   |                                     |                                            |           |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------|
|                                                               | Разработанный состав (заявка № 200501561) | Корпансил (ТУ РБ 00969712.002-2000) | а.с. 1456060 SU (основа – альгинат натрия) | Гидрогель |
| Количество погибших культур, %                                | 3                                         | 6                                   | 10                                         | 5         |
| Поврежденная корневая система при механизированной посадке, % | 4                                         | 12                                  | 6                                          | –         |
| Вид аналогов                                                  | Водный раствор                            |                                     | Твердая форма                              |           |
| Возможность обработки партиями                                | +                                         | +                                   | +                                          | –         |
| Стоимость 1 л (кг) состава, дол. США                          | 1                                         | 1,2                                 | 2,6                                        | 2,8       |
| Расход на 1000 шт. однолетнего посадочного материала, л (кг)  | 2,0...3,0                                 | 2,5...3,0                           | 2,0...3,0                                  | 2,2...3,1 |
| Влагоудерживающая способность, г/г                            | Менее 150                                 |                                     | До 1500                                    |           |

Анализ таблицы свидетельствует, что при обработке разработанным составом количество неприжившегося посадочного материала снижается как минимум в 1,6 раза (аналог «Корпансил») и повреждаемость в 1,5 раза (аналог альгинат). Также следует иметь в виду, что разработанный состав содержит в себе наполнитель с высоким содержанием низко- и высокомолекулярных веществ, которые в составе выполняют не только роль защиты от повреждений корневых систем и от иссушения, но и являются источниками элементов питания, необходимыми для роста и развития лесообразующих пород. Так как в Беларуси, как и во многих странах, посадка леса происходит на низкоплодородных землях, то такой прием позволяет вносить необходимые элементы питания и стимуляторы роста непосредственно в доступную для корневых систем растений зону, что обеспечивает лучшее развитие посадочного материала, как минимум в первое время после посадки леса. Увеличение количества прижившихся культур не только увеличивает выход древесины с одного гектара леса – по оценкам некоторых экономистов, уже в настоящее время экологические полезности одного гектара леса в три раза и более превышают стоимость древесных ресурсов на корню [8]. К таким экологически полезностям относятся: кислородпроизводящая, почвозащитная, полезащитная, санитарно-гигиеническая, водоохранная, климатическая и др., которые являются не товаром, но прямо или косвенно связаны с величиной национального дохода [9].

**Выводы.** В ходе проведенных исследований разработана рецептура композиционного полимерного состава на основе водорастворимых полимеров и органического наполнителя (торф). Оптимизацию состава проводили на основе симплекс-решетчатых планов. Установлено, что максимальным проявлением двух вышеназванных свойств обладает состав при концентрации ингредиентов: 0,27 масс. % – ПАА, 5,0 масс. % – NaKMЦ и 34 масс. % – органический наполнитель (торф), 60,73 % – вода.

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что разработанный нами состав не только не уступает, но по некоторым показателям превосходит известные мировые аналоги при меньшей его стоимости.

Результаты исследований выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T05M-179).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ибрагимов, А.К. Экологические проблемы лесного комплекса: биоразнообразие, биологические ресурсы и система биологической защиты / А.К. Ибрагимов, В.Г. Егорагин, Е.В. Лебедев // сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф.; под. ред. Е.А. Памфилова / БГИТА. – Брянск, 2005. – Вып. 12: Актуальные проблемы лесного комплекса. – С. 73 – 77.
2. Интенсификация выращивания посадочного материала / А.Р. Родин [и др.]. – М.: Наука, 1989. – 78 с.
3. Бобринев, П.В. Ускоренное выращивание древесных пород / П.В. Бобринев. – Новосибирск: Наука, 1987. – 190 с.
4. Gardiner, W. Statistical analysis methods / W. Gardiner. – London: Royal Society of Chemistry, 1997. – 388 p.
5. ТУ РБ 00969712.002-2000: Состав для обработки корневых систем «Корпансил».
6. Состав для защиты корневой системы от иссушения: а.с. 1456060 СССР, МКИ<sup>5</sup> А 01 G 7/06: / В.С. Победов, П.В. Копоть, Л.С. Корецкая и др.; Ин-т механики металлополимерных систем им. Белого. – № 4257493/30-15; заявл. 05.06.87; опубл. 07.02.89 // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 5. – С. 12.
7. Гидрогель // [Electronic resource]. – 2004. – Mode of access: [www.gidrogel.ru/products](http://www.gidrogel.ru/products). – Date of access: 22.01.2004.
8. Сарнацкий, В. Универсальный ресурс / В. Сарнацкий // Лесное и охотничье хозяйство. – 2006. – № 1. – С. 17 – 20.
9. Усеня, В.В. Оценка ущерба от лесных пожаров и экономическая эффективность новых технологий борьбы с ними / В.В. Усеня // Свободная экономическая зона «Гомель-Ратон» – пять лет на экономической карте. Опыт. Тенденции. Перспективы: сб. материалов науч.-практич. конф., г. Гомель 27 мая 2003 г. / ИММС НАНБ; редкал.: И.М. Вертячих [и др.]. – Гомель, 2003. – С. 184 – 187.

Поступила 06.04.2007